

Таким образом, путём испарения мишени ($1,65\text{мол.}\% \text{Fe}_2\text{O}_3\text{:MgO}$): $1,3\text{Al}_2\text{O}_3$ волоконным лазером был синтезирован нанопорошок $3,3\text{ат.}\% \text{Fe:MgAl}_2\text{O}_4$, имеющий сложный фазовый состав. Причинами низкой производительности его получения могут быть как высокая прозрачность этого материала для излучения волоконного лазера, так и небольшой коэффициент преломления этого материала. Последний фактор также может приводить к увеличению глубины проникновения лазерного излучения в мишень и снижению скорости её испарения. Требуется дополнительные исследования. Авторы выражают благодарность Медведеву А. И. за проведение рентгенофазового анализа, Дёминой Т. М. за анализ удельной поверхности и Лисиенко Д. Г. за проведение элементного анализа.

Список публикаций:

- [1] Великанов С. Д., Зарецкий Н. А., Зотов Е. А., Казанцев С. Ю. и др. // Квантовая электроника. 2016. № 1. С. 11.
- [2] Великанов С. Д., Дормидонов А. Е., Зарецкий Н. А., Казанцев С. Ю. и др. // Квантовая электроника. 2016. № 9. С. 769.
- [3] Лисенков В. В., Осипов В. В., Платонов В. В. // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 10. С. 78.
- [4] Осипов В. В., Лисенков В. В., Платонов В. В., Орлов А. Н. и др. // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 5. С. 97.

Исследование влияния ионно-плазменного азотирования на электропроводность легированных сталей

Русских Павел Александрович

Колеух Д.С., Крутиков В.И., Спирин А.В., Мамаев А.С.

Институт электрофизики УрО РАН

Спирин Алексей Викторович, к.т.н.

russkikh_p@inbox.ru

Настоящая работа посвящена исследованию влияния низкотемпературного ионно-плазменного азотирования на электропроводность легированных сталей. На сегодняшний день стали могут составить реальную альтернативу упрочненным бронзам, из которых изготавливают силовые индукторы для магнитно-импульсной обработки материалов (МИО), привлекающей к себе все большее внимание. В последних работах авторов, например [1,2], для магнитно-импульсной сварки труб использовали одновитковые индукторы из стали. Использование для этого стали обусловлено её невысокой стоимостью, доступностью, высокой прочностью и возможностью улучшения прочностных характеристик индуктора наряду с термической закалкой, например, плазменной обработкой. Подход по модификации рабочей поверхности стального индуктора в плазме разряда предложен авторами недавно, в настоящее время реализуется и в полной мере не изучен [3]. Одной из основных характеристик материала индуктора является его электропроводность, которая для конструкционных сталей зачастую неизвестна. Также в литературе не обнаружено результатов исследований влияния на электропроводность сталей плазменной обработки, что и составляет цель работы.

В работе исследованы отечественные конструкционные стали марок: 30ХГСА, 40Х, 50ХГА, 38Х2МЮА, 3Х2В8Ф, 4Х5В2ФС и У8А. Для измерения удельного сопротивления из сталей были изготовлены тонкие пластины шириной, длиной и толщиной соответственно около 6, 25 и 0,4 мм. Часть образцов была подвергнута отжигу, другая – закалке с последующим низким отпускком при 200°C. Часть закаленных образцов далее подвергали азотированию в аргон-азотной плазме электронного пучка ($\text{Ar:N}_2 = 0,8$, $p = 3$ Па) при температуре 500°C в течение 4 часов с двух сторон при плотности ионного тока около 3 мА/см². Такая обработка была применена для азотирования пластин на всю толщину. Использование низкотемпературного (400-500°C) азотирования в плазме разряда позволяет проводить обработку закаленных образцов, что оказывается существенным при изготовлении индуктора. Детальное описание оборудования и процесса ионно-плазменного азотирования можно найти в [4]. Равномерность азотирования тонких пластин оценивали по распределению микротвердости H_v по их толщине, измеренной индентированием, а также по распределению концентрации азота, измеренной методом EDS (рис. 1). Удельное сопротивление сталей измеряли 4-зондовым методом на постоянном токе с погрешностью не более 2,5%.

Из рис. 1 видно, что стали с содержанием хрома не более 1% (30ХГСА, 40Х, 50ХГА и У8А) характеризуются достаточно равномерным распределением азота по толщине пластин. Наименее однородное распределение имеют штамповые стали 3Х2В8Ф и 4Х5В2ФС. Тем не менее, данные по их электропроводности укладываются в общую картину.

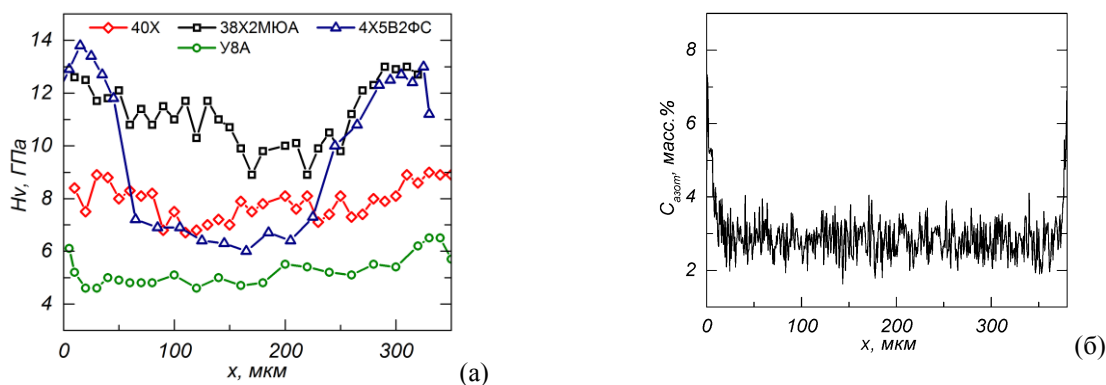


рис. 1. Распределение по толщине пластин микротвердости H_v (а) и концентрации азота в стали У8А (б).

В таблице 1 приведены данные по удельному сопротивлению сталей в состоянии до и после закалки, а также после плазменной обработки. Установлено, что удельное сопротивление сталей после отжига существенно определяется содержанием хрома и в меньшей степени содержанием углерода. Закалка данных сталей с последующим отпуском приводит к значительному, на 20 – 40%, увеличению удельного сопротивления, которое достаточно хорошо коррелирует с содержанием в стали углерода. Это наглядно демонстрируется параметром ρ_q/ρ_a (табл. 1). Скорее всего, это связано с рекристаллизацией зародышей карбидной фазы на основе железа малого размера по границам кристаллов матрицы, которые не обнаруживаются при рентгеновском исследовании.

Таблица 1 Удельное сопротивление сталей

№ п/п	Марка стали	$\rho, 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$			ρ_q / ρ_a	ρ_n / ρ_a
		ρ_a (отжиг)	ρ_q (закалка)	ρ_n (азотирование)		
1	30ХГСА	$34,6 \pm 0,6$	$42,5 \pm 0,3$	$31,4 \pm 0,3$	1,23	0,91
2	40Х	$23,2 \pm 0,3$	$31,6 \pm 0,4$	$20,9 \pm 0,4$	1,36	0,90
3	50ХГА	$23,1 \pm 0,2$	$34,1 \pm 0,3$	$21,5 \pm 0,2$	1,48	0,93
4	38Х2МЮА	$35,2 \pm 0,6$	$44,3 \pm 0,3$	$28,8 \pm 0,3$	1,26	0,82
5	3Х2В8Ф	$35,1 \pm 0,6$	$42,7 \pm 0,4$	$36,1 \pm 0,5$	1,22	1,03
6	4Х5В2ФС	$55,4 \pm 0,7$	$59,4 \pm 1,3$	$52,4 \pm 1,3$	1,07	0,95
7	У8А	$19,3 \pm 0,2$	$27,3 \pm 0,3$	$20,1 \pm 0,3$	1,41	1,04

Примечание: 1) отжиг сталей в вакууме (1 – 6) – 850°C , 7 – 770°C ; 2) закалка на мартенсит (1 – 4) – $(850 - 900^\circ\text{C})$, 5, 6 – 1030 и 1050°C , 7 – 780°C ; 3) двухстороннее азотирование в плазме разряда при 500°C в течение 4 часов.

Весьма неожиданный, но не менее ценный с фундаментальной точки зрения, результат был получен на образцах после азотирования. В большинстве случаев удельное сопротивление азотированных образцов из сталей стало ниже, чем в равновесном состоянии после отжига. Улучшение электропроводности азотированных сталей, в частности, 38Х2МЮА, достигает 22% по отношению к электропроводности после отжига. На данном этапе исследований можно предположить, что наблюдаемый эффект обусловлен связыванием избыточного углерода и хрома азотом. Наименьший эффект был характерен для высокоуглеродистой стали У8А, имеющей структуру перлита, а также для стали 3Х2В8Ф, которая по данным микроскопических исследований имела близкую к стали У8А структуру. В дальнейшем будет проведено исследование электропроводности стали с низким содержанием углерода и хрома, например, 08Ю, которое поможет несколько прояснить картину.

Отметим также, что увеличение электропроводности сложно отнести к какой-либо нитридной фазе в системе “железо-азот”, поскольку азотированные пластины имели градиентную структуру в соответствии с рентгеновскими данными. При этом сформированные в поверхностных слоях фазы в основном нитридов железа составляют не более 10% от толщины пластины, а основным материалом является твердый раствор азота в α -железе.

Таким образом, в ходе выполнения работы получены данные по удельному сопротивлению конструкционных сталей марок: 30ХГСА, 40Х, 50ХГА, 38Х2МЮА, 3Х2В8Ф, 4Х5В2ФС и У8А, в отожженном состоянии, после закалки, а также после низкотемпературного (500°C) азотирования в плазме электронного пучка. Полученные данные, несомненно, представляют интерес, как с фундаментальной точки зрения, так и для разработки магнитно-импульсного инструмента.

Работа выполнена в рамках гос. задания № 0389-2014-0002, частично поддержана грантом РФФИ № 16-08-00919-а и Программой фундаментальных исследований УрО РАН № 15-17-2-27.

Список публикаций:

- [1] V.I. Krutikov, D.S. Koleukh, A.V. Spirin, et al., *Известия ВУЗов. Физика*, Т. 59, № 9/3, 5 (2016).
- [2] В.И. Крутиков, С.Н. Паранин, Д.С. Колех и др., *Известия ВУЗов. Физика*, Т. 57, № 11/3, 264 (2014).
- [3] A. Spirin, V. Krutikov, D. Koleukh, et al., *Book of abstract of EFRE-2016, Tomsk, Russia, October 2–7*, 242 (2016).
- [4] Н.В. Гаврилов, А.С. Мамаев, *ПЖТФ* Т.35, В.15, 57 (2009).